

## КРИОМАГНИТНАЯ СИСТЕМА СО СВЕРХПРОВОДНИКОВЫМИ ОБМОТКАМИ ДЛЯ МАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА

© 2021 г. Д. В. Варюхин<sup>а</sup>, Н. В. Таряник<sup>а</sup>, П. Н. Постол<sup>а</sup>, Д. О. Федюк<sup>а,\*</sup>

<sup>а</sup> Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина  
Украина, 83114, Донецк, ул. Р. Люксембург, 72

\*e-mail: fedukoleg@yandex.ua

Поступила в редакцию 13.05.2021 г.

После доработки 15.06.2021 г.

Принята к публикации 17.06.2021 г.

Описана криомагнитная система со сверхпроводниковыми обмотками, создающая в зоне сепарации (под криостатом) объемом  $1200 \times 200 \times 100 \text{ мм}^3$  магнитное поле с индукцией до 2 Тл. Для создания протяженной зоны сепарации магнитная система выполнена из трех последовательно соединенных сверхпроводниковых соленоидов, при этом оси соленоидов параллельны, а сами соленоиды установлены в одной плоскости друг за другом в направлении большей стороны зоны сепарации. Гелиевый криостат выполнен в виде параллелепипеда с округлыми торцевыми поверхностями и обеспечивает наклон до  $15^\circ$  вдоль продольной оси. Ресурс работы по жидкому гелию составляет 170 ч; по жидкому азоту – 100 ч.

DOI: 10.31857/S0032816221060070

Источником магнитного поля в классических сепараторах служат электромагниты, которые отличаются большими массой (десятки тонн) и габаритами, а также большой мощностью потребляемой электроэнергии (100–200 кВт). При этом они создают магнитное поле с индукцией  $\leq 0.8\text{--}1.0$  Тл [1].

Более эффективным и экономичным решением является использование в сепараторах в качестве источника магнитного поля сверхпроводниковых соленоидов, индукция поля которых в несколько раз больше, а потребляемая мощность в десятки раз меньше.

Криомагнитная система сепаратора [2, 3] для обогащения слабомагнитных руд и минералов состоит из цилиндрического криостата с горизонтальной осью симметрии и сверхпроводниковой магнитной системы. Для обеспечения большой зоны магнитного поля и соответственно большой производительности магнитную систему изготавливают в виде четырех седлообразных обмоток эллиптической формы, которые закреплены на внешней поверхности массивного железного ярма.

Изготовление таких обмоток сопряжено с большими трудностями, главная из которых заключается в необходимости использования нестандартного намоточного оборудования, а также бандажей – ярма для компенсации больших растягивающих механических усилий электромаг-

нитного происхождения на линейных участках обмотки.

В работах [4, 5] представлены конструкции криомагнитных сепараторов, однако они имеют малый объем магнитного поля.

Целью данной разработки является упрощение конструкций сверхпроводниковой магнитной системы и гелиевого криостата, обеспечивающих большой объем магнитного поля в зоне сепарации.

В работе представлены конструкция и результаты исследований криомагнитной системы сепаратора сухого обогащения отходов железной руды в составе сверхпроводниковой магнитной системы (с.м.с.) и гелиевого криостата.

К с.м.с. предъявляются особые требования по пространственному распределению магнитного поля в зоне сепарации: эта зона расположена за пределами криостата (под его дном) и представляет собой параллелепипед с размерами  $1200 \times 200 \times 100 \text{ мм}$ . Сторона параллелепипеда длиной 1200 мм расположена в направлении движения исходного продукта обогащения, а высота параллелепипеда, равная 100 мм, – в направлении вектора индукции магнитного поля. Максимальное значение индукции поля в зоне сепарации составляет  $\geq 2$  Тл, а минимальное – 1 Тл.

С целью обеспечения большого объема магнитного поля в зоне сепарации разработана конструкция с.м.с., которая состоит из трех соеди-

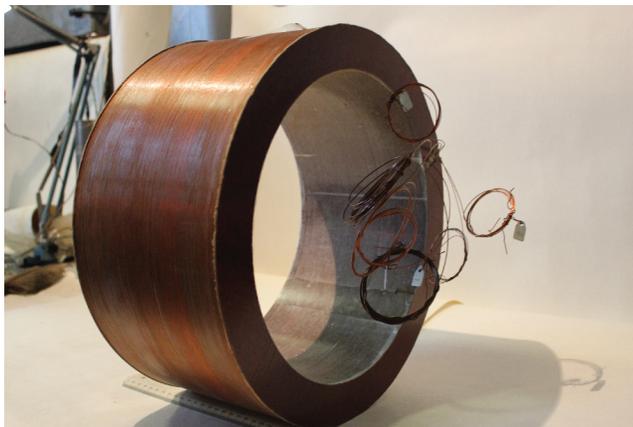


Рис. 1. Бескаркасная обмотка соленоида.

ненных последовательно одинаковых соленоидов цилиндрической формы, при этом оси соленоидов параллельны, а сами соленоиды установлены в одной плоскости один за другим в направлении большой стороны зоны сепарации. Такая с.м.с. моделирует соленоид с эллиптической формой обмотки.

В качестве рабочего варианта для с.м.с. выбран соленоид с диаметром внутреннего отверстия 300 мм, внешним диаметром 385 мм и длиной 180 мм. Внешний диаметр соленоидов ограничен диаметром гелиевой емкости криостата, равным 400 мм, в котором проводились предварительные испытания соленоидов. По размерам, массе и запасаенной энергии магнитного поля такой соленоид относится к классу средних, и для их изготовления, как правило, используют полностью стабилизированный сверхпроводниковый провод с коэффициентом заполнения по сверхпроводнику 5–7%. Однако, ввиду того что критический ток такого провода существенно меньше критического тока частично стабилизированного провода с коэффициентом заполнения по сверхпроводнику 30–50%, использование полностью стабилизированного провода ведет к увеличению размеров и массы обмотки (в 3–5 раз), а также к дополнительным затратам жидкого гелия. Поэтому для изготовления соленоидов использовался частично стабилизированный провод с диаметрами 1.2, 1.0 и 0.85 мм из сплава НТ-50 с коэффициентом заполнения  $\leq 30\%$ .

Соленоиды изготовлены по бескаркасной технологии путем отверждения обмоток эпоксидной композицией УП-6-101 с наполнителем ЭА-1-6 – мелкодисперсным  $\beta$ -эвкриптитом марки Ситалл [6]. Бескаркасная обмотка соленоида показана на рис. 1. Масса сверхпроводника для изготовления одного соленоида составила примерно 50 кг. Снаружи обмотки соленоида установлен бандаж из стали 12Х18Н10Т.

Для регистрации момента перехода соленоида из сверхпроводящего в нормальное состояние параллельно каждой секции подключали диод с лампочкой, по загоранию которой фотокамерой регистрировали этот момент.

Испытания первого соленоида показали, что он выдерживал ток 242 А без перехода в нормальное состояние, в то время как второй и третий соленоиды вели себя иначе – у них наблюдалась “тренировка” критического тока. Максимальный критический ток второго соленоида составил 233 А и был достигнут после четвертого перехода в нормальное состояние, а максимальный критический ток третьего соленоида 231.5 А был достигнут после третьего перехода. Индукция магнитного поля в центре первого соленоида составила 5.2 Тл, в центре второго и третьего – 5.1 Тл, а в обмотке – 7.5 Тл.

Конструктивно соленоиды объединены в блок магнитов – с.м.с. (рис. 2), при этом средний соленоид включен встречно крайним, что позволило увеличить модуль магнитной индукции в рабочей зоне на 11% по сравнению с включением соленоидов в одном направлении. К выводам с.м.с. подключен сверхпроводниковый ключ, обеспечивающий замкнутый режим работы. Для компенсации силы магнитного взаимодействия соленоидов в блоке магнитов используется устройство компенсации. Оно представляет собой две параллельные плиты 2 (см. рис. 2) из сплава Д16, в отверстиях которых установлены и закреплены три соленоида 1, при этом третий соленоид установлен в дополнительной гелиевой емкости 3. Масса с.м.с. составляет 175 кг.

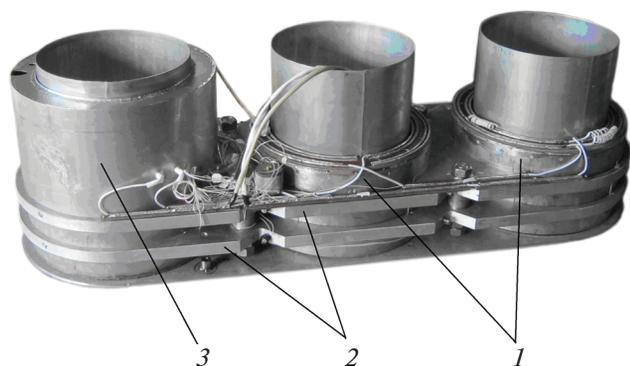
Рассчитана сила магнитного взаимодействия двух соседних соленоидов в с.м.с. [7]:

$$F = \frac{dU}{dx} = \frac{c}{2} \left[ \frac{\Delta L I^2}{\Delta x} \right],$$

где  $L$ , Гн – индуктивность;  $I$ , А – ток;  $F$ , Н – сила;  $\Delta L$ , Гн – изменение индуктивности;  $\Delta x$ , м – виртуальное перемещение соленоида;  $c = 10^2/9.8$ .

Общая индуктивность системы из двух соленоидов равна  $L = L_1 + L_2 + 2M$ , где  $M$  – взаимная индуктивность. Изменение общей индуктивности при перемещении соленоидов обусловлено изменением взаимной индуктивности. Измеренная индуктивность каждого соленоида равна 10.9 Гн. Расчеты взаимной индуктивности, согласно работе [8], показали, что при перемещении одного из соленоидов на расстояние  $\Delta x = 0.05$  м ее изменение составило  $\Delta L = 0.08$  Гн. Тогда при токе в соленоидах  $I = 200$  А сила магнитного взаимодействия двух соленоидов будет равна  $F = 6.4$  т.

Для нахождения неоднородности магнитного поля в зоне сепарации определены компоненты индукции магнитного поля  $B_x$ ,  $B_y$  и  $B_z$  с помощью



**Рис. 2.** Сверхпроводниковая магнитная система из трех соленоидов. 1 – соленоиды; 2 – параллельные плиты; 3 – гелиевая емкость.

измерителя магнитной индукции Ш1-8 на основе датчика Холла. Неоднородность магнитного поля вдоль большой оси на длине 1200 мм составила 11%, а вдоль малой оси на длине 200 мм – не более 9%.

Геометрия с.м.с. предопределила форму гелиевого криостата, который выполнен в виде параллелепипеда с закругленными углами на торцевых поверхностях. Такая форма криостата, в сравнении с цилиндрической, потребовала дополнительного упрочнения плоских тонкостенных оболочек кожуха ребрами жесткости, что существенно уменьшило массу криостата.

Криостат представляет собой цельнометаллическую сварную конструкцию, состоящую из ге-

лиевой и азотной емкостей, охватывающих их радиационных экранов и вакуумного кожуха (рис. 3) [9]. Три вертикальные трубы, образующие теплые каналы, проходящие вдоль осей соленоидов, выполняют роль компенсаторов атмосферного давления, действующего на верхний и нижний плоские фланцы криостата.

Особенностью криостата также является то, что он обеспечивает наклон вдоль большой оси на  $15^\circ$ . Чтобы исключить оголение обмотки соленоидов от жидкого гелия при наклонах криостата, соленоид был помещен в дополнительную гелиевую емкость 3 (см. рис. 2).

Для предотвращения перетекания жидкого азота при наклонах криостата в азотной емкости установлены перегородки.

С целью обеспечения надежной работы криостата в горизонтальном и наклонном положениях в пространстве между верхней крышкой азотной емкости и верхним фланцем криостата, а также между нижней крышкой азотной емкости и верхней крышкой гелиевой емкости установлены стеклопластиковые опоры. Схема распределения усилий в криостате выполнена таким образом, что конечным звеном приложения усилий от гелиевой и азотной емкостей служит верхний фланец криостата.

Радиационные экраны криостата выполнены с разрезами и скреплены в местах разреза стекло-текстолитовыми пластинами, что исключает наведение в них токов Фуко.



**Рис. 3.** Внешний вид криомагнитной системы.

На горловинах криостата установлен коллектор для сбора газообразного гелия и сброса его в газгольдерную систему.

Криостат укомплектован двумя индикаторами температуры и уровня жидкого гелия, а также съемными силовыми и управляющими токовводами.

Геометрические размеры криостата: длина 1540 мм, ширина 640 мм, высота по фланцам 750 мм, полная высота 1380 мм; масса криостата 650 кг. Ресурс непрерывной работы с одной заправкой жидким гелием 170 ч, жидким азотом 100 ч.

Криомагнитная система в составе гелиевого криостата, с.м.с. и блоков питания и управления показана на рис. 3.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сумцов В.Ф.* Электромагнитные железотделители. М.: Машиностроение, 1978.
2. Superconductive high intensity magnetic separator DESCOS. Фирма "KHD Humboldt Wedag", Germany.
3. *Рис Г., Юнгст К.-П., Фёрстер З., Граф Ф., Леманн В., Ункельбах К.-Х., Дюрен Г.* (ФРГ) Патент № 743567. М. Кл<sup>2</sup> В 03 С 1/10 // Бюл. № 23. Оpubл. 25.06.80.
4. *Unkelbach К.Н., Wasmuth H.D.* A Superconductive Drum Type Magnetic Separator for the Benefication of ores and Minerals // XV International Mineral Processing Congress. (2–9 Jule 1985) 1985. V. 1. P. 371.
5. *Кейлин В.Е., Лепехин В.М., Черноплеков Н.А.* А.с. № 1461507 СССР, МПК В03С 1/30 // Оpubл. 28.02.1989.
6. *Комашко А.М., Стецюк М.Ф., Батог А.Е., Зайцев Ю.С., Зарайская Л.Е., Матвеевко Э.Г., Лаптевко А.Е., Курочкин В.И., Гавриш И.Г.* А.с. № 1210443 СССР. МКИ<sup>3</sup> С 08 L63/00 // Зарегистрировано 08.10.1985 (Публикации не подлежит).
7. *Монтгомери Д.* Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов. М.: Мир, 1971.
8. *Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А.* Расчет индуктивностей. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
9. *Постол П.Н., Дворников Е.А., Варюхин Д.В.* // ФТВД. 2013. Т. 23. № 4. С. 128.